

# 构建设施型精准化循环水养殖系统的技术研究

牛化欣<sup>1,2</sup>, 常杰<sup>1</sup>, 雷霖霖<sup>2</sup>, 贾玉东<sup>2</sup>

(1. 内蒙古民族大学动物科学技术学院, 内蒙古通辽 028042; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东青岛 266071)

**[摘要]** 鉴于当前水资源短缺、环境恶化、水产养殖业高速发展,以及保障食品安全等问题的不断呈现,促使资源型工厂化流水养殖模式急需向高效型循环水养殖方向转变,这是产业发展提升的必然趋势。本文以工业化养殖理念为指导、节能减排为目标,以鲆鲽类产业技术体系构建的循环水养殖模式为样板,按循环水养殖系统(RAS)的设计原理,优化养殖工艺流程,构建一种设施型精准化的RAS,并初步分析探讨了海水鱼类在此集成系统中的应用效果。该系统将为广大水产养殖企业提供一种建设成本低廉、系统运行稳定可控、容易管理的实用新型养殖模式,也可为下一步发展现代水产精准养殖工程体系提供理论和实践依据。

**[关键词]** 设施型;工业化;精准农业;循环水养殖系统

**[中图分类号]** S969 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)09-0106-07

## 1 前言

循环水养殖系统(RAS),是当今世界水产养殖系列模式中可达技术精准化、养殖水环境高度可控的一种先进模式<sup>[1]</sup>。通过生物、化学、物理等方法对养殖用水进行净化处理,使其全部或部分用水得到循环利用的工程装置。该种模式的工业化程度最高<sup>[2,3]</sup>,具有节能、减排、节水、节地、可控性强、低风险集约化、产品质量安全可靠等优点。在欧美发达国家的大西洋鲑、鳟、大菱鲆、虹鳟等鱼类养殖中,这种高端养殖模式<sup>[4-9]</sup>得到广泛采用,所以被国际上认为是21世纪发展水产养殖业的主导方向。在我国这种模式正在逐步兴起<sup>[10,11]</sup>。

目前,在我国鲆鲽类养殖中,大多数大菱鲆、半滑舌鳎养殖企业仍然采用“温室大棚+深井海水”流

水养殖模式<sup>[10]</sup>,但已有部分企业超前采用了RAS或半循环水系统<sup>[12]</sup>养殖大菱鲆、半滑舌鳎、鳟、河鲀(红鳍东方鲀、暗纹东方鲀)、石斑鱼等品种。然而,除少数高端RAS养殖企业外,大多数尚处于半循环式的养殖系统,急盼全面转型升级,构建起节能减排、低碳养殖、质量安全的高端养殖模式。我国作为世界水产养殖大国,开发、推广全封闭式循环水养殖系统,推进水产养殖技术向高端、精准、节能、高效方向转变,对于粮食安全和水产品质量的提高具有极为重要的作用。但是,在目前国内技术经济背景下,引进和采用昂贵的国外设备型RAS,尚难得到企业部门的普遍接受和推广应用<sup>[13,14]</sup>,今后的出路在于自主创新,构建国产化的设施型或设施与设备兼容的RAS。

针对现有设备型RAS投资高和系统运行能耗

**[收稿日期]** 2014-06-30

**[基金项目]** 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-50);国家自然科学基金项目(31360640)

**[作者简介]** 雷霖霖,1935年出生,男,福建宁化县人,中国工程院院士,研究员,博士生导师,主要从事海水鱼类生态、繁殖和增养殖技术研究工作;E-mail:leijl@ysfri.ac.cn

高等诸多问题,本文以工业化养殖理念为指导,基于RAS设计原理,瞄准节能减排总目标,以鲆鲽类产业技术体系已经建成的循环水养殖系统为基础,全面提升设施型工艺,构建集固体废弃有机物去除、脱除水体中有害物质,集杀菌消毒、增氧于一体,形成精准化的工业化水产养殖系统。预估本系统的功能全,投资小、运行成本低、易于智能化管理,养殖排放水能够充分循环利用,从而可以缓解日益匮乏的地下水资源和环境污染压力。该系统可广泛应用于水产动物育苗与养成生产,进一步可以为精准化水产养殖工程体系的改进与升级提供参考。

## 2 RAS养殖模式

### 2.1 RAS构建目标

集约化养殖引起的资源高消耗问题、动物品质问题和环境问题,给养殖业、人们健康和生活环境带来了诸多负面影响<sup>[2]</sup>。就水产养殖而言,我国从20世纪90年代从国外引进先进的循环水养殖系统,该养殖模式和技术很快在国内一些有实力的企业推广应用。但是,高经济附加值的养殖品种较少,运行RAS养殖的经济性能难以体现,至今未能被广泛采用。因此,构建投资小、运行成本低、易管理、

效益高、健康生产、产品安全、节能减排等优点的养殖模式,无疑循环水养殖是我国当前迫在眉睫的总体发展目标。

### 2.2 RAS构建的类型

从设施构建和设备运行的类型上,可分为设备型RAS和设施型RAS。

设备型RAS以发达国家成功运行的养殖系统为模板,以系统设备运行来净化养殖用水,可按不同养殖鱼类的生活习性、水体流态以及水处理工艺特性,将其归纳为常规游泳性鱼类、鲆鲽类、鲑鳟类、鳎鲷等4种典型鱼类的循环水养殖系统工艺<sup>[3]</sup>。其工艺流程见图1:养殖池→转鼓或盘式微颗粒机→泵池→蛋白分离器→流化床生物净化→紫外线消毒池→增氧池→养殖池,这种工艺流程为封闭式循环。

设施型RAS,是国内多年来借鉴国外RAS技术经验,利用系统高位差和增建设施(池)对养殖用水进行处理和循环利用,构建形成简易型的循环系统养殖模式。其工艺流程见图2:多养殖池→弧形筛池(内置弧形筛)→泵池→气浮池→三级生物过滤池→脱气池→紫外线消毒池→增氧池→多养殖池,成为目前通用型的国产化封闭式循环水养殖系统模板。

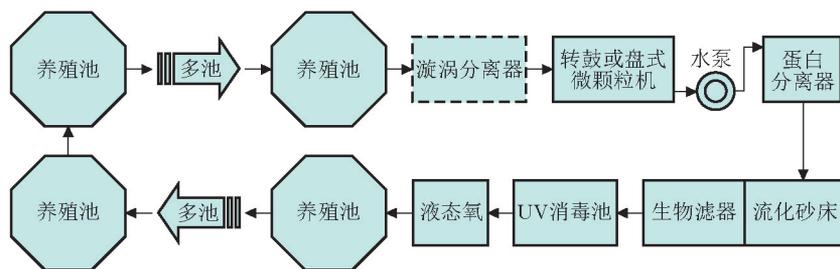


图1 设备型封闭式循环水养殖系统

Fig. 1 Equipment closed recirculating aquaculture system

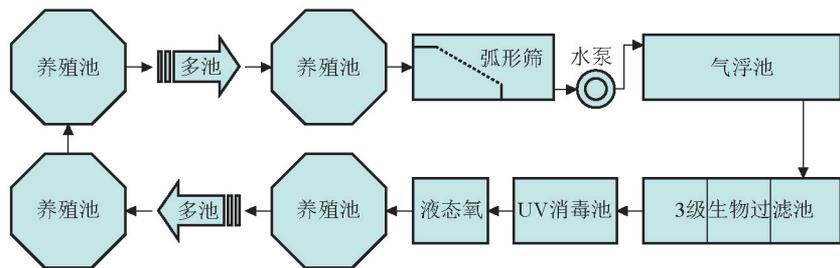


图2 设施型封闭式循环水养殖系统

Fig. 2 Installation closed recirculating aquaculture system

我国作为世界水产养殖大国,在国家蓝色经济区建设大构想的思路指引下,正在实施海陆联动计划,大力推进水产养殖技术向高端、精准、节能、高产方向发展,以海水鱼类养殖为先导,在产区内建立示范样板,不断提升封闭式高端循环水养殖模式,将对粮食安全和水产品质量的提高起到举足轻重的意义。我国的海水鱼类工厂化循环水养殖,以鲆鲽类养殖为例,根据我国的技术经济发展现状,通过10多年的努力,已经成功开发了国产化的高效、节能、低成本RAS及其配套设施<sup>[12,15]</sup>。下一步将抓住有利时机借鉴西方高成本的设备型系统,为我所用转化为国产化低成本的设施型系统,进一步创造出具有区域特色的、能够普及推广的国产化系统模式。

### 2.3 设施型代替设备型的探索

发达国家的RAS,主要依靠设备模块的系统运转来维持高端产业的连续运行,从经济和节能角度考虑,购买这套设备和运转费用相当高,而使发展中国家难以承受和推广。为了打开水处理设备这一核心禁区,对其设备系统实施国产化改造,主要利用设施取代设备功能,或两者兼容达到组装、配套、集成运行:即在养鱼池末端增设一小型低位池(弧形筛池)和增加一无动力的弧形筛来代替微滤机设备<sup>[16]</sup>。改进现行的气浮池和生物滤池非常重要,尤其在净化养殖用水的核心技术上,要突破单一生物滤池的瓶颈,研究物理或电学过滤的新路,以替代蛋白分离器设备和使用液态氧替代制氧机等设备,使整个循环水养殖系统,无论在系统构建上,还是在系统的运转和维护上,都将大幅度降低建设成本和能耗,摆脱养殖过程中对电能、机械能的过度依赖。全面优化设施系统的功能契合,同时增建进、排水系统的合理位差,使整个系统内只保留一级提水泵,其他均由系统内部设施形成的位差自来流来完成,以达到高效、节能、减排的效果。这就是当前推进国产化循环系统不断升级改造、优化系统工程的主题思路。

## 3 设施型RAS构建和设计原理

设施型RAS养殖系统设计见图2。,车间内一般由养殖设施、水处理设施、辅助设施等3部分组成。

### 3.1 RAS工艺流程与设施设备构成

#### 3.1.1 工厂化车间

目前比较常见的工厂化循环水养殖车间,一般

宽度为15 m、长度约80 m。其车间大小主要根据使用场地的而定,车间大体分为养殖区、水处理区和操作管理区3个区域;车间内设1~2套循环水养殖系统,每8~12个养殖池配置循环系统一套。为降低车间建设、运行和管理成本,企业家常采用多连体或多连跨车间设计。

#### 3.1.2 主题养殖区

养殖区包括多个养殖池和进排水管道。养殖池多采用圆形或圆角形养殖池,长宽高规格一般在 $5.5\text{ m}\times 5.5\text{ m}\times 1.0\text{ m}\sim 7.0\text{ m}\times 7.0\text{ m}\times 1.2\text{ m}$ ,圆角形养殖池的圆角半径应大于养殖池半径的1/2,池底采用中间低四周高的“锅底型”,排水口置于池中央最低处,锅底一般为坡度1:10,以利于池底残饵粪便等污物顺利排出;池壁要防水处理,池面光滑、不挂脏,池内建议用养殖池专用涂料粉刷,以防污物和细菌等致病源藏躲其内,以减少病害的发生。RAS管道系统包括进水管、回水管及外源水补充管道。进水管是指由水处理系统进入养殖池的管道系统,由进水主管和入池管组成,进水主管置于车间两侧的池台上,通常选用直径为20~25 cm的PVC管,入池管直径为7.5~9.0 cm。回水管是指从养殖池流向水处理系统的管道,由回水装置和回水主管组成,回水装置<sup>[15]</sup>位于养殖池外侧,此装置具有快速排污、清除养殖池水面杂质、调节养殖池水位和将系统内任意养殖池脱离系统外进行流水养殖等功能;回水主管通常置于中间过道下的地沟两侧,通常选用直径为30 cm左右的PVC管。外源水补充管道的功能是向RAS添加和补充新水,可在泵池、一级截污生物净化池末端及每个养殖池都安置新水补充管头。

#### 3.1.3 核心水质处理区

水处理区由大颗粒过滤池(内设弧形筛)、提水低位池(提水泵)、气浮池、一二三级截污生物净化过滤池、脱气池、紫外消毒池和增氧池组成<sup>[17]</sup>,水处理区面积约占车间总面积的13%;大颗粒过滤池和提水池处于低位,应为砖混结构,池壁厚12 cm;其他池处于高位,为安全起见多设计钢筋混凝土结构,池壁厚20 cm。

大颗粒过滤池内设有弧形筛,可将60目以上的固体颗粒物,如残饵、粪便、颗粒絮状物等过滤掉,若有机颗粒物在RAS中停留时间过长,将会分解并大量积累为氨氮、亚硝酸氮、磷等,使养殖水质恶化<sup>[18]</sup>。因此,增添此设施和无动力的弧形筛来代替全自动

微粒机是比较可行的,可节约运行能耗,减少养殖成本<sup>[16]</sup>。

提水低位池和提水泵,通过弧形筛的水通过落位差自流入提水低位池,低位池内设有提水泵,也称循环泵,可将最低位的水提到高位的气浮池中。

气浮池的作用是利用气浮泵将养殖水通过微气泡的表面张力吸附水中的微细悬浮颗粒物和胶状物质,再以泡沫形式排出系统外,起到净化水质的作用,其气水比是蛋白质泡沫分离器的3倍,而造价为后者的1/5。结合弧形筛可有效地降低了水中有机物的含量,减少生物滤池的负载和水系统中的营养盐<sup>[16]</sup>。增添的设施组合池比传统的机械物理处理方式(滚筒过滤器、蛋白分离器)节省设备投资,且设备易维修,运行成本低。养殖水经过气浮池设施之后,一般只含有水溶性营养盐,可用生物来处理<sup>[19]</sup>。

生物净化过滤池和生物膜(包)培养是循环水养殖的关键设备,也是RAS的技术核心<sup>[20,21]</sup>。生物净化是由附着在生物滤池中生物填料表面的生物

膜完成的,生物膜由多种硝化细菌、有机碎屑和多糖等组成,其主要作用是分解养殖水中的有机质、氨氮、亚硝酸盐、硫化物及磷酸盐等有害物质<sup>[19]</sup>。实践中,生物净化池不但能分解氨氮等有害物质,而且其截污沉淀能力,对于颗粒物的去除、维持系统内水质清新也发挥着不可忽视的作用,因此,生物净化池设计是整个RAS设计的重点。生物净化过滤池由3级滤池组成,考虑冲洗时的可操作性,将原来3级滤池中的弹性毛刷滤料集中安装到第1,2级生物滤池中,使第1,2级生物滤池具有较强的有机物拦截能力。毛刷上附着异养菌菌膜,也能够有效分解进入生物滤池的有机物,弹性毛刷的性质也有利于第1,2级生物滤池的清洗。第3级生物滤池中,使用了比表面积达到300 m<sup>2</sup>/kg的塑料片滤料,使生物滤池具有较高的生物处理能力<sup>[22]</sup>。生物净化过滤池大小决定于系统最大生物承载量、养殖品种的摄食与消化能力、填料比表面积和生物膜的净化能力,其计算公式为

$$\text{生物净化过滤池} = \frac{\text{最大生物承载量} \times \text{体重日投喂量} \times \text{游离氮排放量}}{\text{填料比表面积} \times \text{面积日净化能力}} \quad (1)$$

实践中,生物滤池体积一般设计为有效养殖水体的35%,在此基础上再根据养殖品种的摄食能力和粪便的成型情况作适当调整。

从弧形筛和气浮池剩余的微细颗粒物,多数通过3级生物净化过滤池填料的拦截作用,被大量沉积在池底。为此,在1级生物滤池和2级生物滤池底部设计了专门的斗状集污槽。

脱气池是将鱼类代谢及生物净化过程中产生的大量CO<sub>2</sub>从系统水中脱去。因CO<sub>2</sub>在水中大量富集容易导致养殖水pH值急速下降,当pH值低于7.0时,不但会影响鱼类的摄食与生长,而且会抑制生物膜的生物净化作用<sup>[23]</sup>。解决循环水养殖水pH值下降问题是当前国内外研究的重点和难点,也引起国内业界的高度重视。脱气是解决这一问题的主要方法之一,在水处理系统中专门增设了脱气池,其作用是通过大量曝气以加快水中CO<sub>2</sub>的溢出。

因生物滤池在养殖系统中的地位和作用非常重要,但改进的难度又很大,为此建议今后一定要立专项研究,实施多学科交叉融合,另辟蹊径,探索出一条水处理的新路。

臭氧及紫外线消毒池,添加臭氧的作用是在RAS中杀菌消毒、分解氨氮和除色去味<sup>[24]</sup>。其具体表现为3个方面:杀菌消毒,臭氧不但可以杀灭各种细菌,而且对紫外线不能杀灭的寄生虫、寄生虫卵、真菌及真菌孢子体等具有很强的杀伤力;分解氨氮,一个臭氧与一个氨氮结合生成二氧化氮和水;除色去味,通常情况下,系统运行一段时间以后,养殖水会变黄和略带腥臭味,添加臭氧以后,通过臭氧的强氧化作用,很快使水质变得清澈和清新。

增氧池及设备,在增氧池中水高溶氧是开展高密度养殖和提高生物滤池生物净化效率的保障,增氧池设在水处理系统的末端,养殖水在经过增氧池后直接进入进水主管流向养殖池,通常以液态氧作氧源,采用板式纳米增氧器以气水对流的形式来达到高效溶氧的目的。该方法使增氧系统造价下降了90%,该装置的溶氧效率达75%,水体溶氧量可维持在10 mg/L以上,也可根据所需来调整,能满足养殖密度40 kg/m<sup>3</sup>的溶氧需求<sup>[25]</sup>。

水质自动在线监测系统实时追踪和检测RAS水质指标的变化情况,并根据水质指标及时做出管

理上的调整,同时,水质在线监测系统还可以与气浮泵、紫外消毒器、臭氧发生器、自动投饵机及外源水补充阀联动,基于物联网技术的智能水产养殖系统<sup>[26]</sup>,可实现真正意义上的自动化、工业化养殖。

#### 3.1.4 操作区及其他

操作区主要包括饲料室、消毒间、值班室、监控室、储藏间等,约占车间总面积的4%。车间还包括灯光照明系统和通风系统。

### 3.2 RAS设计原理

#### 3.2.1 基于系统氧物质平衡的设计原理

在RAS的设计中,水中溶氧是水生养殖动物赖以生存和生长的重要的水质因子,关乎水质的好坏和养殖的成败<sup>[27]</sup>。水作为对鱼类的氧气输送介质和对氨和其他废物的去除介质。养殖品种生理生长耗氧和系统外供氧是RAS中氧物质平衡两大输出和输入因素。在RAS养殖品种耗氧量取决于各种因素,如养殖品种种类、规格、呼吸速率、放养密度、饱食量和水温等。

#### 3.2.2 基于系统总氮物质平衡的设计原理

RAS的设计需要提供足够的容纳氮的能力,保持总系统内的总氨氮(TAN)在可接受的水平,并不断将硝酸盐或转换为氮气(脱氮,反硝化作用)。RAS的氮投入和转换需要进行量化,这也决定了生物滤器的规模和水流量的大小。TAN的生产率和硝化作用硝酸盐速度必须能够被准确计算<sup>[28]</sup>。

循环水养殖系统一般使用高蛋白饲料,生产过程中产生的废物及残饵在系统内降解,就产生了TAN。TAN的产生量由RAS饲料投入量(1%~5%的生物量/d)和饲料的蛋白质含量决定(30%~60%)。生物过滤效率和TAN的产生量可确定每日所需水流量,使生物过滤器可以保持理想的TAN水平。此外,每天通过换水使硝酸盐含量维持在可接受的范围内,也可以计算出来<sup>[29]</sup>。

#### 3.2.3 基于系统固体有机物平衡的设计原理

研究表明,向系统中投喂每1 kg饲料就能生成250~300 g的固体废物(残饵和粪便)。这个指标可以用来计算预期的悬浮固体浓度。RAS固体移除构件(即弧形筛、气浮池、3级生物净化过滤池等)的去除效率也需要在质量平衡中计算<sup>[30]</sup>。通过这一过程,可以适当增添处理设施和机械过滤元件。

## 4 RAS运行生态原理与自我维护

### 4.1 生物生态控制原理

RAS是一个菌鱼共生小生态系统<sup>[31,32]</sup>。利用3级生物过滤池来进行生物净化处理,不但是养殖水处理系统的核心,也是养好鱼的基础。RAS建设并调试完成后,快速培养生物膜、构建稳定的生物净化功能是启动RAS的前提,也是生产中最关键的技术。海水RAS研究表明:在水温20℃左右、盐度3.5%的条件下,海水生物净化器的生物膜预培养大约需耗时40~60 d<sup>[22]</sup>。耗时长的主要原因是海水中的盐分对氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的活性具有显著抑制作用。采取边养鱼、边培养和熟化生物膜的方法,可解决此问题。系统启动初期,通过大量添加外源水把养殖水指标控制在安全范围以内,利用鱼类代谢氮源培养生物膜,随着膜净化功能的完善,逐步减少外源水的补充量。系统启动初期的放养密度最好控制在10 kg/m<sup>3</sup>以内<sup>[22]</sup>。

### 4.2 物质输入与病害防控

向养殖池中投喂饲料是鱼获得生长和增重的最重要物质来源。为了保证饲料转化率高,在RAS中投喂优质的饲料,首先是营养价值高、饲料利用率高,其次还要求饲料不带致病菌、饲喂后鱼的粪便成型性好<sup>[33]</sup>。优质饲料可以最大限度地减轻水处理系统的处理负荷,保障系统的正常运行。采取少量多次和控制80%的饱食量的饲喂方法,不但可以提高饲料利用率、避免浪费,而且能起到增强鱼的体质、减少疾病发生的作用。外源水补充是循环水养殖过程中维系水质指标稳定的重要手段,补充点可以在泵池、也可以在1级截污生物净化过滤池,新水补充量应根据养殖水的氨氮、亚硝酸盐及pH值指标来决定<sup>[34]</sup>。

放养健康优质苗种、保持系统内各项水质指标稳定、科学投喂高营养价值饲料是RAS中预防疾病发生的重要措施。一旦发病,切忌在系统内使用任何抗生素,因为抗生素在杀死致病菌的同时也会破坏生物膜上的益生菌,最好的方法是尽快把发病的鱼及养殖池脱离RAS,在系统外完成病鱼的治疗和养殖池的消毒后,再并入系统中<sup>[35]</sup>。

## 5 结语

本文基于“国家鲆鲽类产业技术体系”多年来的实践与研究成果,整合国内外同类信息与技术资源,紧密结合我国国情实际,以RAS的优化、高效运行为发展目标,分析了RAS工艺流程、解决系统功能集成的方法,抓住产业转型升级的有利时机,提出了增添系统功能设施、优化高精度水处理技术;论述了RAS运行原理与自我维护体系的构筑,并深入讨论了构建我国节能减排、优质高效,以及有精准化内涵的陆基循环系统建设方案。可以推测,该系统具有建设成本低廉、操作简便、运行平稳、能耗较低和功能完善等优点,对减少资源浪费、保障产品质量安全和环境保护,将启迪新的发展思路和解决方案,同时也将为我国下一步在“蓝色粮仓”的主产区,广泛构建现代化水产养殖工程体系,提供理论和技术支撑。

### 参考文献

- [1] 雷霖霖,黄滨,刘滨,等.构建基于水产福利养殖理念的高端养殖战略研究[J].中国工程科学,2014,16(3):14-20.
- [2] Tal Y, Schreier H J, Sowers K R, et al. Environmentally sustainable land-based marine aquaculture [J]. *Aquaculture*, 2009, 286: 28-35.
- [3] 刘鹰,刘宝良.我国海水工业化养殖面临的机遇和挑战[J].渔业现代化,2012,39(6):1-4.
- [4] Bergheim A, Drengstig A, Ulgenes Y, et al. Production of Atlantic salmon smolts in Europe-Current characteristics and future trends [J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41: 46-52.
- [5] Baer A, Schulz C, Traulsen I, et al. Analysing the growth of turbot (*Psetta maxima*) in a commercial recirculation system with the use of three different growth models [J]. *Aquaculture International*, 2011, 19: 497-511.
- [6] Magnesen T, Jacobsen A. Effect of water recirculation on seawater quality and production of scallop (*Pecten maximus*) larvae [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 47(3): 1-6.
- [7] Zhang Shiyang, Li Gu, Wu Huiyi, et al. An integrated recirculating aquaculture system (RAS) for land-based fish farming: the effects on water quality and fish production [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45(3): 93-102.
- [8] Steinar S, Sten Ivar S, Bjørn-Steinar S. Coldwater RAS in an Arctic charr farm in Northern Norway [J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41: 114-121.
- [9] Bertrand B, Jean-Paul B, Jean-Yves C, et al. Mass transfer efficiency of a vacuum airlift-Application to water recycling in aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 46: 18-26.
- [10] 雷霖霖.中国海水养殖大产业架构的战略思考[J].中国水产科学,2010(17):600-609.
- [11] 王峰,雷霖霖,高淳仁,等.国内外工厂化循环水养殖研究进展[J].中国水产科学,2013,20(5):1100-1111.
- [12] 倪琦,雷霖霖,张和森,等.我国鲆鲽类循环水养殖系统的研制和运行现状[J].渔业现代化,2010(38):1-9.
- [13] Martins C I M, Eding E H, Verdegem M C J. New developments in recirculating aquaculture systems in Europe: A perspective on environmental sustainability [J]. *Aquacultural Engineering*, 2010, 43: 83-93.
- [14] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, et al. *Recirculating Aquaculture Systems (2nd Edition)* [M]. New York: Cayuga Aqua Ventures, 2002.
- [15] 朱建新,曲克明,刘慧,等.海水鱼类工厂化循环水养殖系统多功能回水装置[P].中国专利:CN102613131A,2012.
- [16] 倪琦,张成林,庄保陆.水产养殖用弧形筛过滤设备[P].中国专利:CN102029084A,2011.
- [17] 王峰,雷霖霖,高淳仁,等.国内外工厂化循环水养殖模式水质处理研究进展[J].中国工程科学,2013,15(10):16-23.
- [18] 王振华.循环水养鱼系统水质参数关系分析[J].中国农学通报,2014(8):57-62.
- [19] 于冬冬,倪琦,庄保陆,等.气提式砂滤器在水产养殖系统中的水质净化效果[J].农业工程学报,2014(5):57-64.
- [20] 张海耿,张宇雷,张业鞅,等.循环水养殖系统中流化床生物滤器净水效果影响因素[J].环境工程学报,2013(10):3849-3855.
- [21] 柳瑶,宋协法,梁振林,等.工厂化循环水养殖中生物流化床的流化特性研究[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2014(1):41-45.
- [22] 张正,王印庚,曹磊,等.海水循环水养殖系统生物膜快速挂膜试验[J].农业工程学报,2012(28):157-162.
- [23] Wout A, Ainhua B G, Jonathan A C, et al. The effect of temperature and pH on the growth and physiological response of juvenile yellowtail kingfish *Seriola lalandi* in recirculating aquaculture systems [J]. *Aquaculture*, 2012, 330: 130-136.
- [24] Schroedera J P, Croota P L, Von Dewitza B, et al. Potential and limitations of ozone for the removal of ammonia, nitrite, and yellow substances in marine recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 45: 35-41.
- [25] Jeonghwan P, Youhee K, Pyong-Kih K, et al. Effects of two different ozone doses on seawater recirculating systems for black sea bream *Acanthopagrus schlegeli* (Bleeker): Removal of solids and bacteria by foam fractionation [J]. *Aquacultural Engineering*, 2011, 44(1): 19-24.
- [26] 刘金权.构建软硬结合的水产养殖物联网解决方案[J].物联网技术,2013(6):10-11.
- [27] 朱明瑞,曹广斌,蒋树义,等.工厂化水产养殖溶解氧自动监控系统研究[J].大连水产学院学报,2007,22(3):226-230.
- [28] 黄志涛.彩虹贝循环水养殖系统的设计与实验研究[D].青岛:中国海洋大学博士论文,2013.
- [29] Simon P G, Paul J D, David F, et al. Nitrogen removal and changes to microbial communities in model flood/drain and submerged biofilters treating aquaculture wastewater [J]. *Aquacultural Engineering*, 2012, 50: 37-45.
- [30] 刘晃,陈军,倪琦,等.基于物质平衡的循环水养殖系统设计[J].农业工程学报,2010(25):161-165.
- [31] 刘艳红,罗国芝,朱学宝.海水闭合循环系统生物滤器微生物特性研究[J].农业环境科学学报,2004(23):540-544.
- [32] Tomoko S, Tadashi A, Tetsuo M, et al. Phylogenetic diversity

- of ammonia- oxidizing archaea and bacteria in biofilters of recirculating aquaculture systems [J]. *Marine Genomics*, 2012(7): 27-31.
- [33] 牛化欣, 雷霖霖. 鲆鲽类专用挤压饲料特性及研发[J]. *水产前沿*, 2012(7): 59-62.
- [34] 黄滨, 刘滨, 雷霖霖, 等. 工业化循环水福利养殖关键技术与智能装备的研究[J]. *水产学报*, 2013(11): 1750-1760.
- [35] 王印庚, 陈君, 潘传燕, 等. 鲆鲽类循环水养殖系统中病原菌的分布及杀除工艺[J]. *渔业科学进展*, 2013(3): 75-81.

# Study on the construction of the facility type precision recirculating aquaculture system

Niu Huaxin<sup>1,2</sup>, Chang Jie<sup>1</sup>, Lei Jilin<sup>2</sup>, Jia Yudong<sup>2</sup>

(1. School of Animal Science and Technology, Inner Mongolia University for the Nationalities, Tongliao, Neimenggu 028042, China; 2. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Minister of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao, Shandong 266071, China)

**[Abstract]** With the hot problem of the deepening of water shortage, environmental degradation, efficient development of aquaculture, food safety and security, etc, which makes that the resource-based factory farming water is gradually an urgent need to efficient type recirculating aquaculture change. In this paper, industrialized farming concept as a guide, energy saving and emission reduction targets to agro-industrial technology research of flatfish system has been based on the model-based recirculating aquaculture systems (RAS) design principles to build accurate “conserving facility type” RAS, optimize their breeding process, and preliminary exploration of marine fish in this integrated system. Low build the system for the majority of aquaculture enterprises to provide a construction cost, the system is stable, practical farming model is easy to manage, but also for the further development of aquaculture in the establishment of modern precision engineering system to provide basic theory.

**[Key words]** facility type; industrialization; precision agriculture; recirculating aquaculture system